

Über die Verwendung von Wechsellicht bei thermischen Strahlungsempfängern

Bauer, Georg

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 3, 1951, S. 1-9



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Über die Verwendung von Wechsellicht bei thermischen Strahlungsempfängern

Von Georg Bauer

Vorgelegt von Herrn E. Justi

Abstract: The author shows by simple calculations that the radiation sensitivity of thermal receivers becomes about four times smaller if one operates the receiver with alternating light instead of constant light. But the smaller disturbances of the alternating light method and the possibility of using electronic amplifiers yield practically the same limit of accuracy as the method of constant light. The author gives some relations among the heat capacity, the heat transfer and the modulation frequency of resistance bolometers which should be attended to obtain the optimal sensitivity. This limit is still smaller for the alternating light method in comparison with constant light, where the thermal motion of the electrons dominates. Assuming plausible conditions for the band-width of the alternating light and the time of measure for constant light the accuracy of the alternating light bolometer becomes still diminished by the factor 5. So one concludes that the smallest detectable amount of radiation in relation to the disturbances is about 20 times smaller in the case of modulated light.

1. Einleitung

Strahlungsempfänger, die so gebaut sind, daß bei Bestrahlung das Empfangssystem eine möglichst große Temperaturerhöhung erfährt, die dann als Maß für die zugeführte Strahlungsleistung genommen wird, nennt man thermische Empfänger. Gewöhnlich ist der eigentliche Empfänger mit einer Schwärzungsschicht versehen, so daß gleichmäßige Empfindlichkeit in allen Spektralbereichen bewirkt wird. Die Temperaturerhöhung selbst wird durch die von ihr hervorgerufene Änderung irgendeiner Eigenschaft des Empfängers gemessen, z. B. der elektrischen Leitfähigkeit, der Dielektrizitätskonstante, der Thermospannung usw. Meist führt diese letzten Endes wieder zur Messung einer elektrischen Größe (Strom oder Spannung), deren Betrag bei der Bestrahlung I gewöhnlich als Empfindlichkeit angegeben wird.

Solche thermischen Empfänger werden üblicherweise mit Gleichlicht, d. h. zeitlich konstanter Bestrahlung, benutzt. Die Anwendung einer elektrischen Meßmethode führt dann zur Messung eines Gleichstromes oder einer Gleichspannung; zur Messung sehr kleiner Strahlungsleistungen braucht man ein hochempfindliches Galvanometer, da sich die Verwendung von Gleichstromverstärkern, abgesehen von Anpassungsfragen, wegen ihrer Störanfälligkeit im allgemeinen nicht empfiehlt.

Für manche Zwecke hingegen ist es günstiger, mit Wechsellicht, d. h. zeitlich veränderlicher Bestrahlung zu arbeiten, wobei zweckmäßigerweise sinusförmige Modulation gewählt wird. Eine elektrische Meßmethode ergibt in diesem Fall einen Wechselstrom bzw. eine Wechselspannung; mit Hilfe eines Verstärkers können auch sehr kleine Strahlungsleistungen mit einem

üblichen unempfindlichen Instrument gemessen werden. Außerdem ist bei Verwendung von Wechsellicht die Störanfälligkeit der Anordnung viel geringer, da ja nur Störungen von der verwendeten Frequenz verstärkt und folglich wirksam werden. Aus den gleichen Gründen kommen auch langsame Nullpunktswanderungen, die sich selbst bei bester Konstanz der Umgebungstemperatur bei thermischen Empfängern nie ganz vermeiden lassen, durch Verwendung von Wechsellicht nicht zur Wirkung.

Schließlich verlangen bestimmte Meßanordnungen aus anderen Gründen einen Empfänger, der auf Wechsellicht anspricht; so z. B. wenn 2 Lichtbündel verglichen werden, von denen jedes intensitätsmoduliert ist und die eine Phasenverschiebung von 180° haben; bei gleicher Intensität ergänzen sie sich zu Gleichlicht.

Es sollen die besonderen Verhältnisse, die sich aus der Verwendung von Wechsellicht bei thermischen Strahlungsempfängern ergeben, besonders nach zwei Gesichtspunkten untersucht werden. Einmal soll festgestellt werden, ob und welche besonderen konstruktiven Maßnahmen bei Wechsellicht erforderlich sind; zum anderen muß geklärt werden, wo die theoretische Meßgrenze bei Wechsellicht liegt.

2. Das Wärmegleichgewicht des Empfängers

Die Differentialgleichung, welche die Energiebilanz des mit moduliertem Licht bestrahlten thermischen Empfängers darstellt, ist schon früher von verschiedenen Autoren angegeben worden¹⁾. Es seien K die Wärmekapazität des Empfängers, V die Wärmeverluste*) des Empfängers je Sec und Grad Über-temperatur, ΔE die zugeführte konstante Strahlungsleistung, Θ die Über-temperatur bei Bestrahlung, t die Zeit; dann gilt:

a) bei konstanter Einstrahlung ($E = \text{Const.}$): Gleichlicht.

$$K \cdot \frac{d\Theta}{dt} + V\Theta = \Delta E, \quad (1)$$

$$\Theta = \frac{\Delta E}{V} \left(1 - e^{-\frac{V}{K}t} \right), \quad (1a)$$

für den Endzustand: $\Theta = \Delta E / V, \quad (1b)$

b) bei sinusförmig modulierter Einstrahlung ($E = E/2 \cdot (1 + \cos \omega t)$): Wechsellicht.

$$K \cdot \frac{d\Theta}{dt} + V\Theta = \frac{\Delta E}{2} (1 + \cos \omega t), \quad (2)$$

$$\Theta = \frac{\Delta E}{2V} \left(1 - \frac{2V^2 + \omega^2 K^2}{V^2 + \omega^2 K^2} e^{-\frac{V}{K}t} \right) + \frac{\Delta E}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{V^2 + \omega^2 K^2}} \cos(\omega t + \varphi), \quad (2a)$$

dabei ist φ der Phasenwinkel; für diesen gilt: $\tan \varphi = \frac{K\omega}{V}$. Die allein maßgeb-

*) Wärmeverluste entstehen durch Abstrahlung, Wärmeleitung und bei den als „Wärmekraftmaschinen“ arbeitenden Empfängern (z. B. Thermoelement) durch den Umwandlungsprozeß von Wärme in eine andere Energieform.

liche Amplitude der Temperaturmodulation wird:

$$\Theta_{\sim} = \frac{\Delta E}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{V^2 + \omega^2 K^2}} \quad (2b)$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß die Wärmeabgabe proportional der Über-temperatur sein soll. Für sehr kleine Strahlungsleistungen und folglich ebenfalls sehr geringe Übertemperaturen gilt dies in erster Näherung immer; die Rechnung interessiert aber gerade für den Fall sehr schwacher Bestrahlung.

Das Verhalten des Empfängers ist wesentlich charakterisiert durch die Größen V und K bzw. deren Verhältnis. Der Quotient K/V hat die Dimension einer Zeit, er wird häufig „Zeitkonstante“ genannt. Es ist die Zeit, in der im Gleichlichtfall der Bruchteil $1 - e^{-1} = 63\%$ der Endtemperatur erreicht wird. Für Gleichlicht ist deren Wert $\Delta E/V$, unabhängig von der Größe der Wärmekapazität; diese bestimmt für gegebenes V lediglich die Zeitkonstante.

Für Wechsellicht wird nach Abklingen des Exponentialgliedes ein dauernder Temperaturanstieg um $\Delta E/2V$, das ist gerade die Hälfte der bei Gleichlicht eintretenden Endübertemperatur, sich einstellen. Darüber gelagert ist eine mit der Frequenz schwankende Wechselkomponente der Temperatur mit der Amplitude $\Delta E/2 \cdot (V^2 + \omega^2 K^2)^{-1/2}$. Für sehr kleines ω kann diese Amplitude günstigstenfalls den Wert $\Delta E/2V$ annehmen.

Welches ist nun die Abhängigkeit der Temperaturschwankung von der Wärmekapazität und den Wärmeverlusten? Solange man die für die Temperaturerhöhung um $\Delta E/2V$ benötigte Zeit nicht berücksichtigt, ist die Temperaturamplitude um so größer, je kleiner beide Größen sind. Doch darf man die Zeitkonstante nicht völlig außer Acht lassen. Wird diese, etwa mit abnehmendem V , bei konstantem K zu groß, so steigt die zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes benötigte Zeit stark an, wodurch sich für die Praxis nicht mehr tragbare Werte ergeben können. Bei Verringerung der Wärmeableitung V ist also stets im entsprechenden Maß die Wärmekapazität K mit zu verkleinern, wenn man eine brauchbare Wirkung erzielen will. Dagegen bedeutet Verringerung der Wärmekapazität K allein stets eine Verbesserung.

Neben der Amplitude der Temperaturschwankung interessiert noch das Verhältnis dieser zur optimal möglichen ($\Delta E/2V$); es werde Modulationsgrad M genannt. Für diesen ergibt sich:

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 K^2}{V^2}}} \quad (3)$$

Man sieht sofort, daß M um so näher an dem günstigsten Wert 1 liegt, je größer V und je kleiner ω bzw. K ist. Doch sagt die Größe von M ja noch nichts über den Betrag der Temperaturamplitude selbst aus. Vergrößert man M durch Vergrößerung von V , so ist nichts gewonnen, da gleichzeitig die Temperaturamplitude entsprechend kleiner wird. Dagegen ist Verringerung von K günstig.

3. Die Strahlungsempfindlichkeit

Wir nehmen an, das Meßverfahren sei derart, daß als Ergebnis der (sehr kleinen) Bestrahlung ΔE die Spannung ΔU auftritt. Dann wird nach Ab-

schnitt 1 als Strahlungsempfindlichkeit S der Quotient $\Delta U/\Delta E$ bezeichnet. Diesen kann man zerlegen in:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta E} = \frac{\Delta U}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta E} \quad (4)$$

Der Quotient $\Delta T/\Delta E$ ist im vorigen Abschnitt bereits berechnet worden, wobei $\Theta = \Delta T$ zu setzen ist. Im Einzelfall hat man nur zu überlegen, aus welchen anderen Größen sich die Wärmeabgabe V gegebenenfalls zusammensetzt und ob sie eine Konstante oder von anderen Größen, z. B. der Temperatur, abhängig ist.

Das eigentliche Empfangssystem ist bei allen thermischen Empfängern eine sehr dünne Folie, die meist frei ausgespannt ist. Durch die geringe Dicke wird gleichzeitig kleine Wärmekapazität und kleine Wärmeableitung an den Aufhängepunkten erreicht. Teilweise werden aber die Empfängerfolien auch unter Zwischenschaltung einer wärmeisolierenden Schicht auf einen massiven Träger aufgebracht. Dies kann insbesondere erforderlich sein, wenn die Eigenschaften des betreffenden Materials derart sind, daß keine freitragende dünne Schicht hergestellt werden kann. Schließlich ist noch zu berücksichtigen, ob der Empfänger sich im Vakuum oder in einem Gas befindet.

Hat man ein freitragendes System im Hochvakuum vor sich, so erfolgt die Wärmeabfuhr überwiegend durch Wärmestrahlung. Die Größe V ist in diesem Fall temperaturabhängig und hat den Wert $V = 4\sigma F T^3$, wie eine einfache Überlegung ergibt (σ Stefan-Boltzmannsche Konstante, F Empfängerfläche, T Empfängertemperatur). Befindet sich der Empfänger in Gasatmosphäre oder auf einem Träger, so ist die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung meist allein ausschlaggebend. Dann ist V annähernd konstant und, da die Strahlungsverluste stets gleichzeitig vorhanden sind, erheblich größer als im erstgenannten Fall.

Der Quotient $\Delta U/\Delta T$ ist eine Frage des verwendeten Meßprinzips und der Schaltung. Grundsätzlich kann man nun zwei Typen von Empfängern unterscheiden:

Die elektrische Meßgröße, also hier die Spannung, wird durch Erwärmung selbst erzeugt; Beispiel: Strahlungs-Thermoelement.

Die zu messende Spannung ist das Ergebnis eines anderen Meßverfahrens; Beispiel: Bolometer.

a) Strahlungs-Thermoelement

Die Größe $\Delta U/\Delta T$ ist hier einfach gleich der Thermospannung je Grad, also für den betreffenden Temperaturbereich annähernd eine Konstante. Die Strahlungsempfindlichkeit ist demnach proportional der Temperaturschwankung und die günstigsten Bedingungen sind die, für welche die Temperaturschwankung sehr groß wird (s. Abschn. 2).

b) Bolometer

Es werde das am meisten verwendete Widerstands-Bolometer betrachtet; für alle Empfänger dieses Typs, bei denen durch die zur Messung verwendete Spannung eine Aufheizung des Empfängers eintritt, gelten die gleichen Über-

legungen. Der Einfachheit halber werde die Wärmeabfuhr V zunächst als Konstante angenommen, also der Fall eines freitragenden Empfängers mit Gasfüllung oder eines auf einen Träger aufgebrachten Empfängers behandelt. Es ergibt sich:

$$\text{Aus (1b) bei Gleichlicht:} \quad \frac{\Delta T}{\Delta E} = \frac{1}{V}. \quad (1c)$$

$$\text{Aus (2b) bei Wechsellicht:} \quad \frac{\Delta T}{\Delta E} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{V^2 + \omega^2 K^2}}. \quad (2c)$$

Sei außerdem T_0 die Umgebungstemperatur, T die Temperatur des Empfängers unter dem Einfluß der Meßspannung, R der Widerstand des Empfängers, U die Spannung am Empfänger, so gilt:

$$\frac{U^2}{R} = V(T - T_0), \quad (5)$$

$$U = \sqrt{RV(T - T_0)}. \quad (5a)$$

Bezieht man, um von der Schaltung selbst unabhängig zu werden, auf die Spannung am Empfänger, so ist

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = U \alpha, \quad (6)$$

wobei α der Widerstandstemperaturkoeffizient (WTK) ist. Man erhält aus (5a), (6) und (1c) bzw. (2c):

$$\text{für Gleichlicht:} \quad S_+ = \alpha \sqrt{\frac{R(T - T_0)}{V}}, \quad (7)$$

$$\text{für Wechsellicht:} \quad S_- = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{R(T - T_0)}{V + \frac{\omega^2 K^2}{V}}}. \quad (8)$$

Hier sind — durch die von der Meßspannung herrührende Erwärmung des Empfängers — im Wechsellichtfall die Verhältnisse völlig anders als beim Thermoelement.

Das Optimum der Strahlungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von V liegt hier bei $V = \omega K$; dann hat nämlich der Ausdruck $V + \omega^2 K^2/V$ ein Minimum. Außerdem wächst die Empfindlichkeit mit $\sqrt{T - T_0}$ mit zunehmender Empfängertemperatur an; dies gilt natürlich nur, solange V konstant anzusehen ist.

Für sehr hohe Empfängertemperaturen überwiegen in jedem Fall die Abstrahlungsverluste und V muß durch $4\sigma F T^3$ ersetzt werden. Auch wenn man von vornherein mit überwiegenden Strahlungsverlusten rechnet, ergibt sich ein Maximum für eine bestimmte Temperatur, das bei Bolometern bekanntlich stets auftritt.

Dieses Ergebnis ist von erheblicher Bedeutung. Praktisch kann man die Wärmekapazität nicht über einen bestimmten Wert hinaus verringern; außerdem wird die tunlichst niedrig gewählte Modulationsfrequenz den Betrag von etwa 10 Hz nicht wesentlich unterschreiten können. Damit ist aber der günstigste Wert der Wärmeabfuhr V festgelegt. Dieser liegt praktisch so, daß

bei Wärmeabgabe nur durch Strahlung V noch zu klein ist. Man erhält eine größere Strahlungsempfindlichkeit, wenn man die Wärmeabgabe erhöht.

Deshalb ist es — wenn man Wechsellicht verwendet — bei einem freitragenden Empfänger vom Bolometertyp günstiger, nicht im Hochvakuum zu arbeiten, sondern mit einer Gasfüllung, welche die Wärmeableitung auf den erforderlichen Betrag erhöht²⁾. Wenn man aber schon eine gewisse Mindestgröße der Wärmeabfuhr braucht, kann es bequemer sein, diese dadurch zu erreichen, daß man die Empfängerfolie auf einem Träger aufbringt. Denn es ist technisch wesentlich einfacher, eine sehr dünne Schicht auf einen Träger als eine freitragende Schicht herzustellen. Damit hat man vor allem hinsichtlich des Empfängermaterials mehr Möglichkeiten, da sich auch Substanzen geringerer mechanischer Festigkeit verwenden lassen.

4. Vergleich der Empfindlichkeit bei Gleich- und Wechsellicht

Für das Bolometer ergab sich zu vorgegebener Wärmekapazität und Modulationsfrequenz stets eine günstige Größe der Wärmeabfuhr. Andererseits ist das gleiche Bolometer bei geringeren Wärmeverlusten empfindlicher, falls Gleichlicht angewendet wird. Ein freitragendes Bolometer etwa, das seine maximale Wechsellichtempfindlichkeit erst bei einem Gasdruck von einigen Torr zeigt, ist für Gleichlicht und Hochvakuum wesentlich empfindlicher.

Neben diesem für das Bolometer kennzeichnenden Unterschied zwischen Wechsel- und Gleichlichtempfindlichkeit gibt es einen für alle thermischen Empfänger gemeinsamen. Dadurch, daß die Temperaturschwankung bei moduliertem Licht um eine mittlere erhöhte Empfängertemperatur erfolgt, verliert man gegenüber dem Gleichlicht den Faktor 2.

Da der Modulationsgrad 1 nicht erreicht werden kann, wird man sich praktisch mit einem geringeren Wert, etwa $0,72 = 1/\sqrt{2}$ begnügen müssen. Dies ist beim Bolometer gerade der Modulationsgrad, für den sich günstigste Strahlungsempfindlichkeit ergibt ($V = \omega K$). Diese Bedingung gibt eine Verschlechterung um den Faktor $\sqrt{2}$.

Die bisherigen Betrachtungen verglichen den Endausschlag bei Gleichlicht mit der Amplitude bei Wechsellicht. Man mißt aber bei Verwendung von Wechsellicht nie die Amplitude, sondern den Effektivwert. Dies führt zu einem weiteren Empfindlichkeitsverlust um den Faktor $\sqrt{2}$.

Ein Wechsellichtverfahren ergibt also gegenüber Gleichlicht grundsätzlich eine um den Faktor 4 geringere Strahlungsempfindlichkeit.

Daß man trotzdem mit Erfolg Wechsellicht verwendet, hat seinen Grund hauptsächlich in der geringeren Störanfälligkeit und bequemerer Handhabung. Man kann mit Wechsellicht viel einfacher und mit kleinerem Aufwand an die theoretische Grenze herankommen, während dies bei Gleichlicht bis heute noch nicht der Fall ist. So kommt es, daß mit der theoretisch unempfindlicheren Wechsellichtmethode praktisch dieselben Ergebnisse erzielt werden wie mit Gleichlicht.

Trotzdem ist es wichtig, diesen grundsätzlichen Unterschied zu kennen, vor allem im Hinblick auf die noch mögliche Verbesserung der Empfindlichkeitsgrenze.

5. Empfindlichkeitsgrenze

Für die kleinste meßbare Bestrahlungsstärke sind die grundsätzlich unvermeidbaren Störungen bestimmend; diese sind hier:

a) die Temperaturbewegung der Elektronen in dem Kreis Empfänger-Meßsystem (Nyquist-Rauschen);

b) die spontane Temperaturschwankung des Empfängers.

Bei den üblichen Konstruktionen führt die Temperaturbewegung der Elektronen zu einem um rund 1 Zehnerpotenz höheren Wert der Störungen gegenüber den spontanen Temperaturschwankungen, so daß erstere die Meßgrenze festlegen³⁾. Man kann diese erniedrigen, indem man die Strahlungsempfindlichkeit — die hier noch eingeht — erhöht. Dies kann, solange man die Temperatur der Umgebung nicht ändert, nur durch Vergrößerung des Quotienten $\Delta U / \Delta T$ erfolgen, da $\Delta T / \Delta E$ nicht über die durch die unvermeidbare Abstrahlung gegebene Grenze erhöht werden kann. Beim Bolometer bedeutet dies Wahl eines Materials mit höherem WTK, beim Strahlungs-Thermoelement eines Stoffes mit entsprechend höherer Thermospannung. Hier sind folglich noch gewisse Möglichkeiten gegeben.

Die eigentlich thermodynamische Grenze jedoch ist durch die spontanen Temperaturschwankungen des Empfängers festgelegt. Die Größe der Strahlungsempfindlichkeit ist hier ohne Belang, da bei höherer Empfindlichkeit lediglich die Schwankungen besser verstärkt werden. Einen weiteren Gewinn darf man dann nur von einer Erniedrigung der Umgebungstemperatur erwarten; dies wirkt sich in verschiedener Weise aus.

Die Störungen, die mit T^1 gehen, werden in jedem Fall geringer; soweit es sich um die Temperaturbewegungen der Elektronen handelt, kann dieser Gewinn aber nur voll ausgenutzt werden, wenn man sowohl Empfänger als auch Meßsystem oder wenigstens dessen erste Stufe gleichzeitig auf tiefe Temperatur bringt.

Wärmeableitung (je nach Konstruktion) und auch Wärmekapazität können bei tiefen Temperaturen geringer sein. Unter Beachtung der in Abschn. 3 abgeleiteten Beziehungen läßt sich gegebenenfalls eine Verbesserung erzielen.

Die unvermeidliche Wärmeabfuhr durch Abstrahlung wird geringer; ein Empfänger, für den diese maßgeblich ist, wird dadurch empfindlicher.

Wie wirken sich diese Einflüsse bei Gleichlicht und Wechsellicht aus?

a) Temperaturbewegung der Elektronen

Die Größe der Rauschspannung ist:

$$\text{für Gleichlicht:} \quad \Delta U = \sqrt{\frac{2 k T R}{\tau}} \quad 4), \quad (9)$$

$$\text{für Wechsellicht:} \quad \Delta U = \sqrt{4 k T R \Delta \nu} \quad 5). \quad (9a)$$

τ Meßzeit, k Boltzmannsche Konstante, $\Delta \nu$ Bandbreite; wobei der Faktor $\sqrt{2}$ bei Wechsellicht bereits die Messung des Effektivwertes berücksichtigt.

Damit kann man die kleinste meßbare Bestrahlungsstärke bzw. deren Verhältnis bei Gleich- und Wechsellicht berechnen. Da hier nur letzteres interessiert, ist es gleichgültig, welches Vielfache des Störpegels man als Meßgrenze ansetzt.

Das Verhältnis der kleinsten meßbaren Bestrahlungsstärke bei Wechsellicht zu der bei Gleichlicht beträgt:

$$G = 4 \sqrt{\lambda \nu \cdot \tau}. \quad (10)$$

Setzt man für die Meßzeit im Gleichlichtfall die Schwingungszeit eines üblichen Galvanometers ein, so darf man als mittleren Wert 5 Sekunden annehmen. Die Bandbreite im Wechsellichtfall wird bei Frequenzen der Größenordnung 10 Hz wohl kaum kleiner als etwa 5 sec^{-1} zu machen sein; außer dem bereits für die Empfindlichkeiten abgeleiteten Faktor 4 ergibt sich für die Grenzemphindlichkeit zusätzlich der Faktor 5. Man kann also mit einem Wechsellichtverfahren im Grenzfall nur eine etwa 20mal größere Bestrahlungsstärke feststellen als bei Verwendung mit Gleichlicht, falls die Meßgrenze durch Nyquist-Rauschen bestimmt wird.

b) Temperaturschwankungen des Empfängers

Versucht man die entsprechenden Überlegungen für diese Störungen anzustellen, so kommt es wesentlich auf die Zeitabhängigkeit an. Bei einer Gleichlichtmessung stört eine Temperaturschwankung, wenn ihre Dauer von der Größenordnung der Meßzeit ist. Bei einer Wechsellichtmessung dagegen wirkt sich eine Temperaturschwankung nur dann voll aus, wenn sie im Rhythmus der Modulationsfrequenz erfolgt. Hierzu wäre noch zu klären, ob durch die von der modulierten Bestrahlung hervorgerufenen regelmäßigen Temperaturänderungen etwa die spontanen Schwankungen beeinflusst werden können.

Über diese Fragen können vorläufig noch keine ausreichenden Aussagen gemacht werden, wenn auch Ansätze dazu vorliegen. So wird meist in gleicher Weise bei Gleichlicht wie bei Wechsellicht die maximale Schwankung angesetzt, obwohl eine Möglichkeit die andere ausschließt. Die maximale Schwankung ergibt sich, unabhängig von der Zeit, zu:

$$\Delta T = T \sqrt{\frac{k}{K}} \quad (11)$$

Praktisch ist diese thermodynamische Grenze heute wohl noch nicht erreicht, wenn es auch gelegentlich behauptet wurde⁷⁾. Da man dazu bereits ungewöhnlich hohe Werte der betreffenden Materialkonstanten benötigt, erscheint es vorerst unmöglich, die Störungen durch Temperaturbewegungen der Elektronen so weit zu verkleinern, daß sie unter den durch spontane Temperaturschwankungen verursachten liegen. Erst dann lassen sich aber letztere nachweisen.

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß bei Verwendung von Wechsellicht die Strahlungsempfindlichkeit thermischer Empfänger grundsätzlich um etwa den Faktor 4 gegenüber der Gleichlichtempfindlichkeit geringer ist. Praktisch kommt man wegen der geringeren Störanfälligkeit mit Wechsellichtverfahren aber zu der gleichen Meßgrenze.

Für Empfänger vom Typ des Bolometers wird eine Beziehung zwischen Wärmekapazität, Wärmeverlusten und Modulationsfrequenz abgeleitet, die zur Erreichung der günstigsten Empfindlichkeit eingehalten werden muß.

Die Empfindlichkeitsgrenze liegt, falls die Temperaturbewegung der Elektronen für sie bestimmend ist, bei Wechsellichtverfahren noch ungünstiger; unter plausiblen Annahmen für die Bandbreite im Wechsellichtfall und die Meßzeit bei Gleichlicht ergibt sich zusätzlich der Faktor 5, so daß der kleinste nachweisbare Wert etwa um den Faktor 20 höher liegen kann.

Literatur

- ¹⁾ J. M. W. Milatz u. H. A. Van der Velden, *Physica*. **10**, 369 (1943).
R. Clark Jones, *Journ. Opt. Soc. of Amer.* **37**, 880 (1947).
- ²⁾ M. Czerny, W. Kofink u. W. Lippert, *Ann. Phys.* **8**, 65 (1950).
- ³⁾ G. Bauer, *Phys. Zs.* **43**, 301 (1942).
- ⁴⁾ F. Zernicke, *Zs. f. Phys.* **40**, 628 (1927).
- ⁵⁾ H. Nyquist, *Phys. Rev.* **32**, 110 (1928).
- ⁶⁾ W. Dahlke u. G. Hettner, *Zs. Phys.* **117**, 74 (1941).
- ⁷⁾ R. Clark Jones, *Journ. Opt. Soc. of Amer.* **39**, 344 (1949).